

道路交通流の物理的性質(II)

t-s ダイアグラムによる交通流の表示

Physical Properties of Road Traffic Flow (II)

Descriptions of Traffic Flow by Means of t-s Diagram

高木 相

東北大学名誉教授

Tasuku Takagi

Professor Emeritus, Tohoku University

キーワード： 交通流 (traffic flow)、t-s ダイアグラム

連絡先：〒981-0952 仙台市青葉区中山5 - 2 - 20

E-mail : tasuku@sirius.ocn.ne.jp

1. はじめに

本シリーズ「道路交通流の物理的性質」は筆者が1990年から在勤した日本大学、東北文化学園大学から今日に至るまで行なった研究結果を系統的に整理することを目的に執筆するものである。当時、まだ十分な説明ができる知見が得られていなかった部分については新しく得た知見を加えながら解説することとする。

前報告では、道路交通流の研究を始めることになった経緯を含めて、車の動きについての測定結果(交差

点発散特性、加速特性、車頭(車間)時間)とそれに関連した交差点スループット等の考察を述べた¹⁾。この中で、車両群の動きは t-s ダイアグラム(t-s(Time-Space)Diagram)によってグラフ上に記述することにより、視覚的に全体像が見えることを述べた。本文では、いろいろな交通流についての t-s ダイアグラムの形を示して、これが交通流の解析に極めて有効であることを示す。

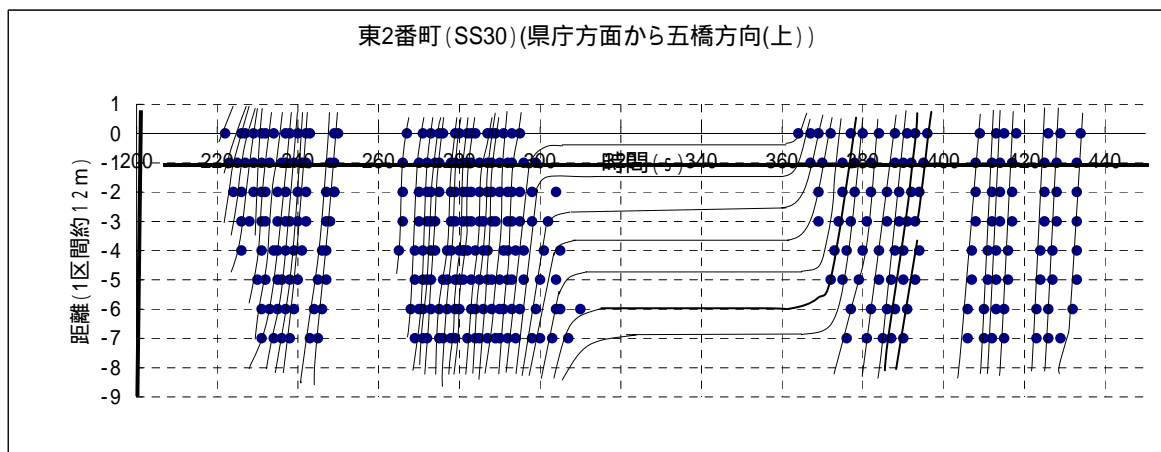


図 2.1 実際の t-s ダイアグラムの例

2 .ts ダイアグラムの事例と線形化モデル

2.1 ts ダイアグラムの事例

図2.1は実際に測定して得たts ダイアグラムである。これは、仙台市東2番町通りの高層ビル、SS30 から撮ったビデオ映像（東北文化学園大学科学技術学部鈴木祥介准教授による）を解析したものである。ドットが測定点、実線が測定点を結んだもので、一本の線が一台の車の走行軌跡である。このような図をTime-Space Diagram(ts ダイアグラム)と称する。交通流の物理的性質は縦編で明らかになるように、このts ダイアグラムを解析することによってほとんど全ての性質が導出できる。

2.2 線形化ts ダイアグラム

図2.1は交差点の赤信号の前後のts ダイアグラムである。赤信号時間内には車は停止しているので平坦な直線が続く。そして、青信号点灯時に発進するときはある加速度で加速しながら定常速度に達する。この一連の測定と解析については前編で詳しく解説した¹⁾。一般に、走行する自動車の軌跡は曲線を描く。しかし、車群の挙動の解析に、停止から定常速度までの軌跡を正確に取り入れる意味はほとんどないといってよい。とくに、停止に向かう減速度の軌跡は全く意味をもたない。前編¹⁾でも減速時のデータは省いている。この意味から、ts ダイアグラムは適当な折れ線近似で解析するのが最も効果的であると考えられる。

図2.2は図2.1の350秒から400秒の間を直線で描いたts ダイアグラムである。

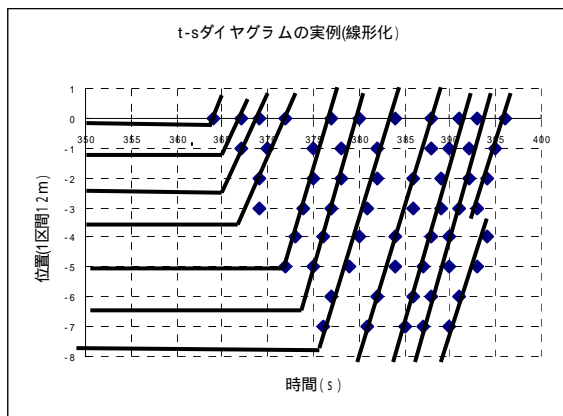


図 2.2 線形化した ts ダイアグラム

図 2.2 のように、線形化すれば、モデル化と解析は楽になる。

2.3 ts ダイアグラムのパラメータとモデル

以上のことから、ts ダイアグラムは以下のようにモデル化することができる。まず、ts ダイアグラムを規制するパラメータについて考える。

1) パラメータ T と V

図2.1,2.2において、測定値の点(ドット)は車がある一定の場所(縦軸)を次々に通過するタイミングを表している。ドットとドットの間の時間を車頭時間(Time-Headway)という。ここではこれを T とする。異なる位置での対応する車の測定値(ドット)を結ぶ線の傾きはその車の速度を表す。ここではこれを V とする。速度 V は一般の道路交通では1時間当たりの距離を単位(km/h)で示されるが、筆者のこのシリーズでは全て単位は国際単位系SIを用いる。つまり、それぞれは

時間 T の単位: 秒 (s)、

速度 V の単位: メートル毎秒 (m/s)

とする。毎時間当たりの速度は

$$\text{km/h} = 3.6 \times V(\text{m/s})$$

によって換算される。

ここで、 T と V が ts ダイアグラムを特性づける2つのパラメータであることが分かる。

2) ts ダイアグラムのモデル

図2.2のように線形化したts ダイアグラムをモデル的に T, V との関係を入れて一般的に描けば図2.3のようになる。図中の記号の意味を下記に示す。

T_R : 赤信号時間 (s)

T_G : 青信号時間 (s)

(黄信号時間は無視、または赤信号時間にかかえる)

V_j, T_j : j 車の速度 (m/s) と車頭時間 (s)

T_i : i 車の交差点前での車頭時間 (s)

T_{of} : i 車の交差点発進後の車頭時間 (s)

L_{of} : i 車の停止時の道路占有距離 (m)

図2.3は速度 V 、車頭時間 T 、停止時占有距離 L_{of} がそれぞれ異なる場合を模擬して線形化した ts ダイアグラムを示している。図中赤信号で出来る停止線を繋ぐ点線は、いわゆるショックウェーブと呼ばれるところ

である。前車の影響が最も強く影響するところで、時間とともに、前車が停止したことによって起こるショックが後車に次々に影響するという現象である。

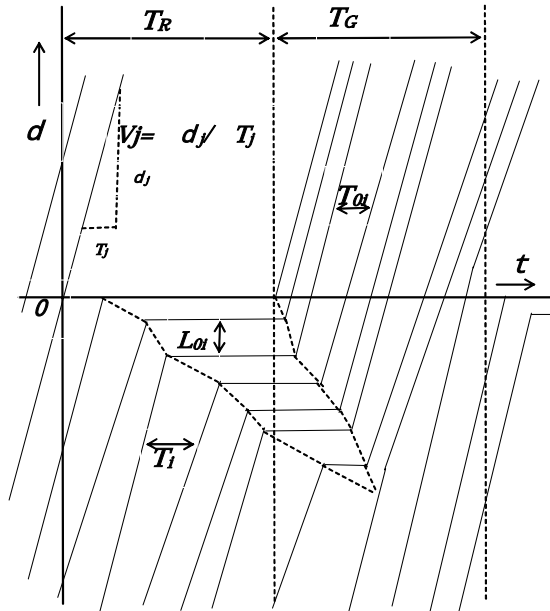


図 2.3 線形化した t-s ダイアグラム (交差点の例)

3) 平均化線形 t-s ダイアグラム (実用的モデル)

$V_j, T_i, T_\alpha, L_\alpha$ などのパラメータが異なる一般的な状況を取り入れた解析は、図 2.3 の t-s ダイアグラムのように線形化しただけでは複雑である。しかし、われわれが交通流について、実的に知りたいことは、当該道路の、現状について情報と、その状況がどのように変化しているのか(渋滞に向かっているのか、解消に向かっているのか)を知りたいということである。そうすれば、ある適当な時間(例えば信号 1 周期程度の時間)で平均化してその間は上記のパラメータは変化しないとして扱うのが合理的である。また、通常の道路の利用形態は大体決まっており、大型車の混入率、速度などはあらかじめ調査して置けば T 以外の他のパラメータは一定として扱ってよいであろう。

図 2.4 は図 2.3 をこの意味で平均化した図である。以後の議論では T, V 以外のパラメータは同じ道路なら大きい変動はないであろうということを進める。

交差点で出来た車列が青信号で解消していく過程での T_0 は最短車頭時間となるということである。つまり、

もっとも高い密度での自動車流となるということである。

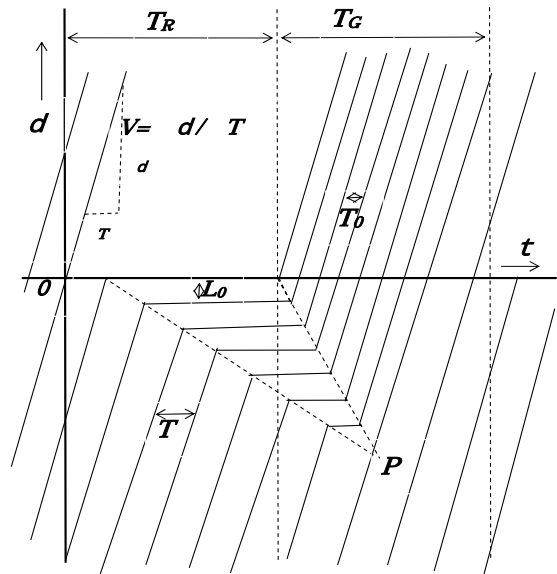


図 2.4 図 2.3 を平均化線形 t-s ダイアグラム

図中 P 点はショックウェーブ(6.参照)が消滅するポイントである。どの時点で消滅するかは 4 個のパラメータ (T_R, V, L_α, T など) から計算出来る。これは続編の課題である。

3. 実データから見る交通流と t-s ダイアグラムの関係

3.1 速度-車頭時間 ($V-T$) 関係から見る交通流の 3 つの領域

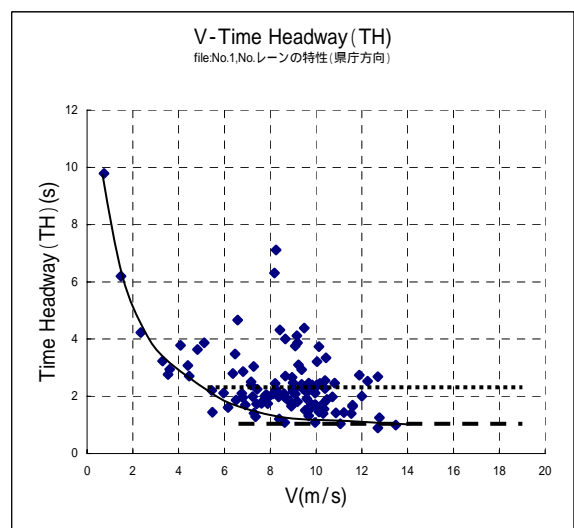


図 3.1 速度 V と車頭時間 T の関係 (測定例)

図3.1は前編(Ⅰ)¹⁾でも記載したものであるが、このデータから交通流には速度をパラメータにして、およそ3つの領域(Phase(相)と云ってもよい)が存在することが明らかになる。

図3.1の太い点線(水平)は T の実測値の最小値をなぞったものである。これが水平である範囲は T が V に依存しない領域である。この領域から V が段々小さくなってくると、 T は V に拘束される領域となる。図3.1で V が小さくなると、 T は $1/V$ に比例して大きくなる(続編で明らかになる)。これは渋滞の領域である。渋滞の状態では前の車が動かないため、強制的に速度を落とさざるを得ず、このため車間時間が大きくなる。つまりこの領域は拘束領域である。図3.1ではデータはないが、 V が大きいところでは車は自由に走行可能な自由領域である。この領域では T は大きくなる。

以上のことから、 V - T 特性について概念的に図示すると図3.2のように描くことができる。この図に示すように、 V - T 特性には次のような3つの領域が存在することが分かる。すなわち

- 自由領域: V と T が無関係(独立)な領域(車流がまばらで T は大きくなる)。
 V の平均最高速度を V_M とすると、 V - T 曲線(点線)は V_M に近づく)
- 準拘束領域: V と T が無関係から相関を持ち始める領域(車流密度により、 V が小さくなるにつれて V - T 曲線は最小値に近づき、さらに V が小さくなると、今度はこの線から離れる。離れる程度が大きくなるにつれて V と T の独立性が失われていく)
- 拘束領域: V と T の独立性がなくなる領域(渋滞で V が小さくなるにつれて T が大きくなる。 V - T 曲線は $V=0$ に接近する)

以上が V - T 特性の定性的・概念的解釈である。包連

3.2 V - T 特性カーブと交通流量の関係

図3.2の V - T 曲線は、図3.1で示しているように、 V に対応して分布する T の最小値をなぞった下限線

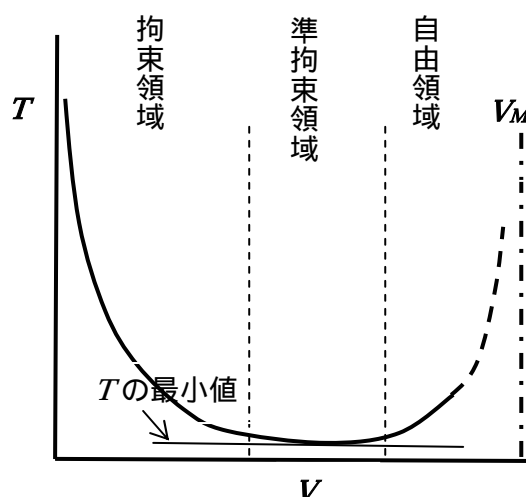


図3.2 V - T 特性の3つの領域

である。そして、図3.2に示すようにこの曲線は、ある V の範囲(準拘束領域)で T は最小値を辿る。この領域では走行する車の頻度が最も高くなるということである。本研究では、流量(q で表す)(続編で述べることになるが) $1/T(s^{-1})$ で定義している。この定義によれば、準拘束領域での流量が最も大きくなる。通常、流量 q には V が影響すると考えられるが V がほとんど影響しない領域を準拘束領域と定義している。

図3.3は縦軸に流量 $q(=1/T)$ をとり、速度 V との関係を推察したものである。 $q=0$ となる点は $V=0$ と $V=V_M$ の2点である。すなわちこの2点では $T=$ となるということである。最大流量は準拘束領域にある。似た関係として、A. D. Mayの本には速度と1時間当たりの通過台数(流量)との関係が測定例として紹介されており、図3.2と同じ傾向を示している²⁾。

図3.3の q - V カーブは q の上限値の包絡線であるから、実際の流量はこれ以下の値になる。実用的見地から、実際の流量を予測するためには、時々刻々の短時間平均流量を予測する必要がある。この議論は、今後纏める予定の続編における重要なポイントであることを付記する。

3.3 3領域に対応するt-sダイアグラムの形

平均化線形t-sダイアグラム(図2.4)を図3.2(図3.3)に対応して描くと図3.4のようになる。

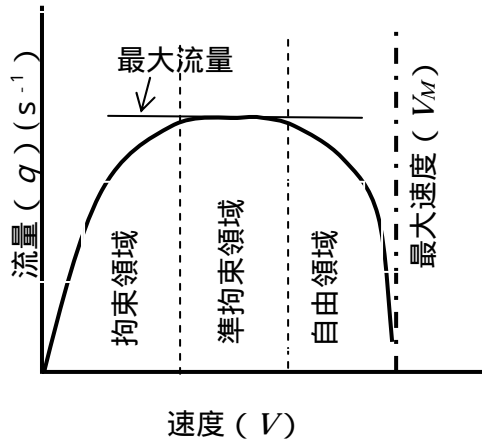


図 3.3 速度と流量の関係(最大値包絡線)

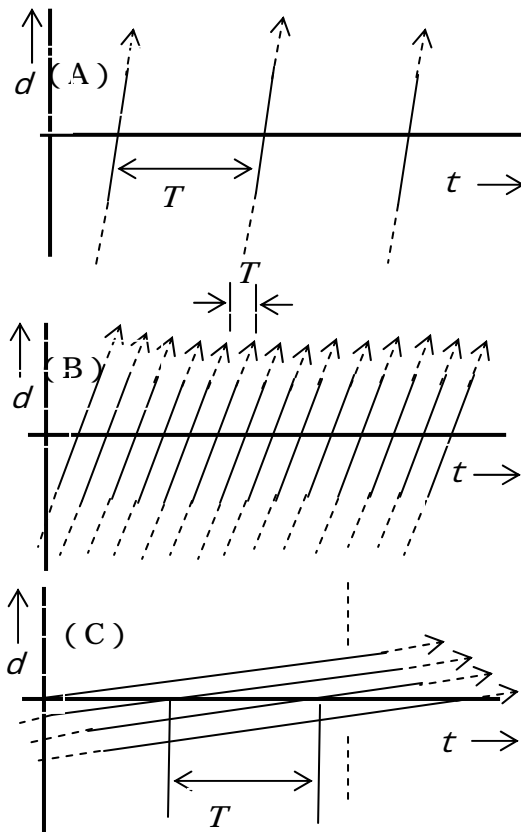


図 3.4 各領域の t-s ダイアグラム
(A)自由領域、(B)準拘束領域、
(C)拘束領域

3 領域に対応する平均化線形 t-s ダイアグラムは図 3.4 に示すように、(A)の自由領域では速度の制約が無いため、一般に高速度である。このことは直線の傾きが急であることを意味する。この領域では、車の密

度は小さく、従って車間時間 T は大きい。準拘束領域 (B) では、最も T が小さく、直線の傾きは (A) と比べてやや小さくなる。 T が小さいということは密度が高いことを意味する。実例例図 3.1) で見ると、 T の平均値は車間時間は約 2 秒である (図 3.1 の細い点線)。よって、(B) における車間時間 T は 2 秒あたりに値をとる。拘束領域 (C) では車は身動きが困難な状況である。速度は極端に小さく (余裕が極めて緩やか) になり、従って、やむを得ず T は大きくなるを得ない。流量は速度の下降とともに急速に小さくなる。渋滞状態はこの領域である。

4. 交差点での t-s ダイアグラム

交通流に最も大きい影響を与えるのは交差点である。ここで交差点に入る車の車間時間に注目して、そこのできるショックウェーブの形について述べることにする。

4.1 交差点における車列の変化と t-s ダイアグラムの原型モデル

交差点を含む道路交通流の図を図 4.1 に示す。この

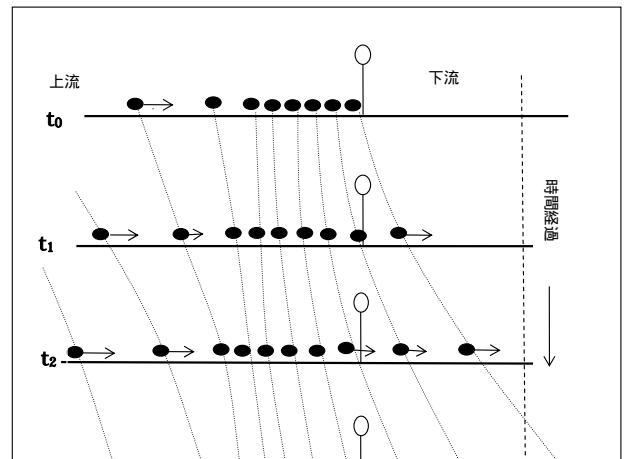


図 4.1 交差点発進時の車列の時間変化
(t-s ダイアグラムの原型モデル)

図は信号(赤)で停止している車列(t_0 の時点)が青信号で発進する様子を示している。時間の経過を縦軸にとり、距離を横軸(道路)にとっている。各時間(t_i, t_j)におけるそれぞれの車の位置を細い線で示している。この線群で横軸を時間、縦軸を距離とすれば、これがすなわち t-s ダイアグラムに他ならない。これが t-s ダイア

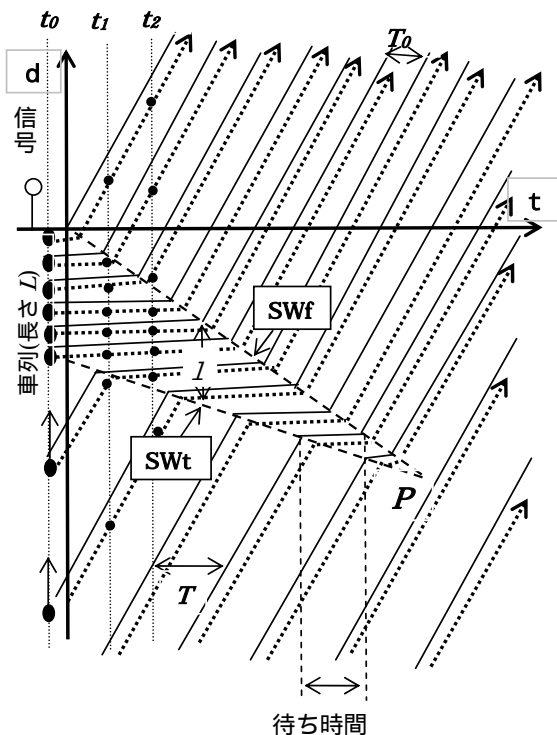
グラム原型である。次にこれを平均化線形t-sダイアグラムに書き換えてみよう。

4.2 車の動きとt-sダイアグラム—図4.1に対応した平均化線形モデルでの表現

図4.1は実際の道路上での車列の動きである。これを図2.4にモデルとして示した平均化線形t-sダイアグラムで描いてみる。図4.2がその図である。

t-sダイアグラムでは、横軸は時間(t)、縦軸は距離(d)である。

図4.1に対応して車の動きを図4.2によって見てみよう。鎖線は車の進行方向を示す。



- : t_1, t_2 の時点の車 (先頭車と2番) の位置
- : t-sダイアグラム
->: 車の動く方向 L : 車列長
- SWf: ショックウエーブ (波頭)
- SWt: ショックウエーブ (波尾)

図4.2 青信号発進時の車列の動きとt-sダイアグラム(平均化線形モデル)

図4.1で、時刻 t_0 の時点で停止車6台後続車2台で

ある。時刻 t_1 の時点では発進車は先頭車のみ、 t_2 の時点で2台が発進している(図中●点でそれぞれの時点の車の位置を示す)。以下このような対心で図4.2は描いてある。t-sダイアグラムの平均化線形モデルでは動いている車の車間時間 T (従って車間時間あるいは車間距離)をある時間区間で平均しているので、交差点に向かう入力車の間隔は一定である。

交差点を出る車の平均間隔 T_0 は平均約2秒である。実線がt-sダイアグラムである。これが図2.4のモデルに対応する。

L はある時刻での車列長である。初めの車列長 L が時間と共に減少する場合は描かれているが、これについては5章で、またショックウエーブ(SWf, SWt)については6章で述べる。

5. 渋滞の発生と解消の定量化の基礎考察

交通問題で最も重要なことは、交通流の現状の定量的把握と渋滞の発生・解消の予測技術の開発である。詳細な議論は続編にゆずることとするが、ここでは原理的な事項を述べる。この原理の理解が次章で述べるショックウエーブ論の理解の助けになるためである。

ここでは図4.2をもとに定量的な基礎事項を述べる。まず初めに、交差点では

- ・渋滞は上流において発生する
- ・赤信号で車列が出来たとき、待ち時間が最大赤信号時間 T_R を越えないときは渋滞とは云わない

ということを理解しておこう。つまり、図4.2(図2.4)の P 点を通る車とその信号周期内の現在青信号時間内に交差点を通過できるときは、その待ち行列(長さを図4.2の L で示す)は渋滞待ち行列とは云わないということである。渋滞とは、従って、 P 点を通る車が現在の青信号で通過できず、次回以降の青信号時間まで待たなければならぬときからである。 P 点は T に依存して動く。これについては次章で述べる。

6. 交通流におけるショックウエーブ(SW)

ショックウエーブ(shockwave)は衝撃波といわれる音響物理現象のひとつであるが、交通流では、前車

の動きに後続車が追従しながら走行するとき、前車の速度変化が後続車に次々と伝搬する現象を波が現象として表現したものである。図 2.4 と図 4.2 に交差点で生じる典型的なショックウエーブの形が示されている。

続編で詳しく述べるが、交通流の解析にショックウエーブ論は有用である。しかしこれまで、交通流の解析にショックウエーブ論を積極的に活用した例はあまりないようである。

ショックウエーブは交差点に限らず、交通渋滞の発生・解消の過程で見られる現象であるが、ここでは最も典型的なショックウエーブを発生させる交差点に着目してその性質の概要を述べることとする。

図 4.3 は車流量の違いがショックウエーブの出来方、形にどう影響するかを示したものである。(A)、(B)、(C)、(D) の4つの場合を示している。(A) から順にみてみよう。注目点は交差点に入力する車の頻度(車頭時間 T の大きさ)の影響である。

(A) ショックウエーブ(SW)が発生しない時:
 T が大きく(車がまばらで)赤信号時間 T_R と同程度になると SW の発生はない、車の待ち時間は高々 T_R である。

(B) SW の発生
 交通流が大きくなり、 T が T_R より小さくなると SW の発生が見られるようになる。しかし、 P 点を通過する車は現在の青信号で通過している。(SWf: SW の波頭 SWt: 波尾) 車の待ち時間は高々 T_R である。
 渋滞はない。

(C) SW が長くなる場合
 (B) の場合より T がさらに小さくなると(流量が増えたと)、SW は長くなる。この図の場合、SW が収束する点 P は、青信号時間内にあるが、 P 点を通過する車は現在の青信号では通過出来ず赤信号時間にかかる。次の青信号まで待つことになる。
 渋滞の初期の現象である。

(D) SW が消滅しない場合
 P 点が次の赤信号時間にかかるようになると、待ち時間が T_R を越す車が出てくる。この状態に

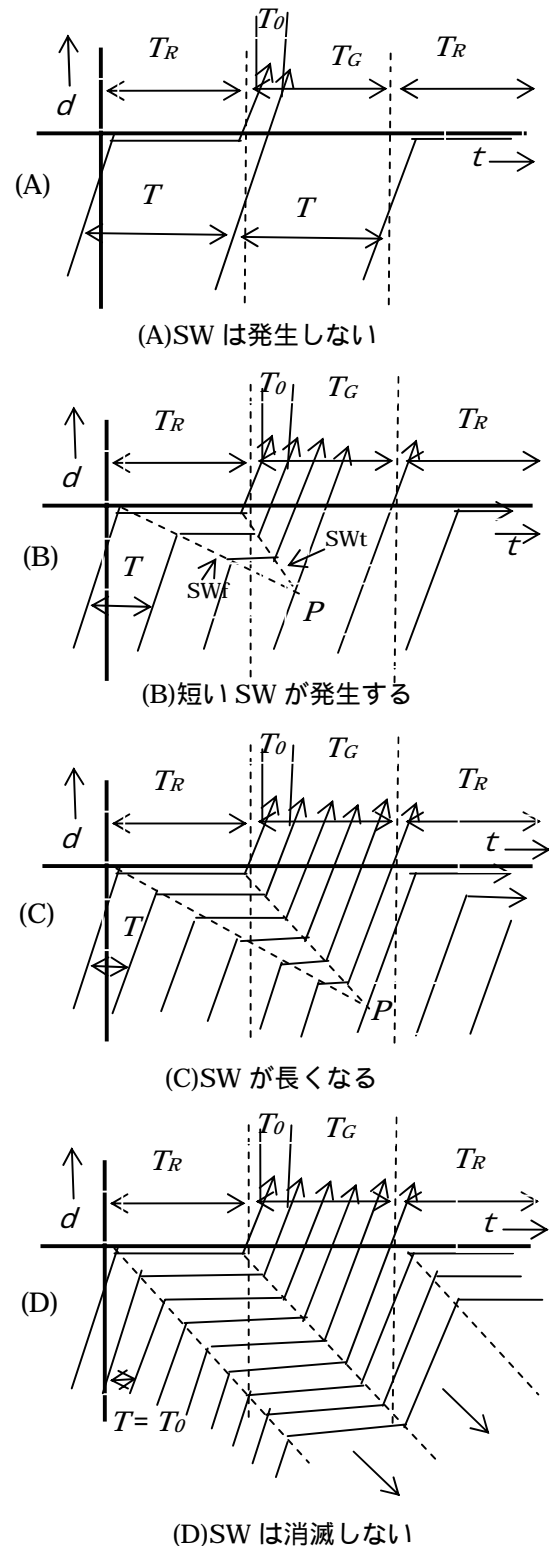


図 4.3 T の変化による SW の変化

なると、次の青信号まで待つことになる。さらに T が短くなると SW の収束点 P はさらに遠くな

り、信号待ちをくり返すことになる。(D)はその極限の状態を示している。極限的渋滞の状態では $T=T_0$ のとき起こる。このときはSWf とSWt は平行である。

7. おわりに

本文ではシリーズの第2編として、t-s ダイアグラムによる交通流の表示について述べた。以下にその要点を述べる。

- 1) 道路交通流の車頭時間 T と速度 V を道路に沿って複数地点で測定し、そのデータから t-s ダイアグラムを作成すれば交通流のマクロ的挙動を把握することができる。すなわち、交通流の物理的性質のほとんどは t-s ダイアグラムの解析から明らかにすることができることを述べた。
- 2) 平均化線形 t-s ダイアグラムモデルを導入した。生データによる t-s ダイアグラムは複雑でマクロ的時間変化は困難であるが、ある時間間隔で T と V を平均化することにより、実用的解析が容易になることを示した。
- 3) 交差点交通流を例に平均化線形 t-s ダイアグラムを示し、その中でショックウェーブを示した。
- 4) ショックウェーブについて、これがどのようにして生じるか、また形がどのように決定されるのかを、交通流(車頭時間)の違いによる図によって明らかにした。
- 5) 渋滞に至る過程をショックウェーブの形の変化(交通流の変化)から説明し、さらに、定量的に求める手がかりを与えた。

以上の通りであるが、ここでの基本は1)で述べた交通流の物理はすべて t-s ダイアグラムの解析によって明らかになる、ということである。以後本研究では平均化線形 t-s ダイアグラムを解析モデルとする。さしあたりの問題は、平均化を如何に行なうかということである。交通流は時々刻々変動する。従来は習慣的に、5分間、10分間、1時間などの通過台数をもって流量としている。しかし、これでは現状の交通状態が5分先にどうなるかを判断すること

は出来ない。続編で議論すべきことは多いが、本文から指摘される続編の課題には次のようなものである。

- i) 測定法; 車頭時間 T と速度 V をどのような手法で測定するか
- ii) 測定データ(T と V)の平均の取り方; 平均時間間隔、時間間隔単純平均、移動平均(この場合平均する個数)をどう選ぶか
- iii) ショックウェーブの理論展開と応用
- iv) 渋滞発生・解消の理論と実際との対応
- v) 道路交通の予測法の開発とシミュレーション

謝辞

第1編でのべたように、本研究は日本大学工学部東北文化学園大学を経て現在に至るまで多くの学生の協力があつた。t-s ダイアグラムの形については、日大平成10年度の学生(第1編(I)の謝辞)のほか、東北文化学園大学平成14年度の学生、大久保圭二、佐々木貴広、杉山一代の3君がt-s ダイアグラムの研究に参加した。この結果が本文の一部となっている。ここに深謝する。また図2.1のt-s ダイアグラムの実例は東北文化学園大学鈴木祥介准教授が撮影したビデオをもとに作成したものであるが、撮影に当たって、スミセイビルマネージメント仙台支店長高橋秀一氏に便宜を図っていただいた。厚く御礼申し上げる次第である。

文献

- 1) 高木相: “道路交通流の物理的性質(I) 挙動の調査”、計測自動制御学会東北支部第246回研究集会(福島大)、資料番号 246-17 (2008.11.19)
- 2) A. D May: “Traffic Flow Fundamentals”, p. Prentice-Hall (1990) p. 291